

3. 变压器负载运行

负载运行：是指一侧绕组接电源，另一侧绕组接负载运行

- 1 负载运行时的电磁物理现象
- 2 基本方程式
- 3 归算
- 4 归算后的基本方程、等效电路和相量图
- 5 近似等效电路和简化等效电路

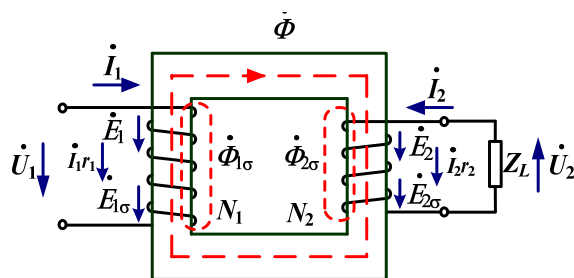


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1/8

I. 负载运行时的电磁物理现象



- 变压器的初级、次级绕组没有电的联系，功率传递依靠互感
- 在功率传递过程中应满足能量守恒，在电路上需满足电压平衡，在磁路上需满足磁势平衡



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

2/8

I. 负载运行时的电磁物理现象

初级、次级电流间的约束关系

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1$$

约束: $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$

► 表明当有负载电流时，初级电流 \dot{I}_1 应包含有二个分量

• \dot{I}_m 用以激励主磁通

• \dot{I}_{1L} 所产生负载分量磁势 $\dot{I}_{1L} N_1$ ，用以抵消次级磁势 $\dot{I}_2 N_2$ 对主磁路的影响

$$\dot{I}_{1L} N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0$$

► 励磁电流 \dot{I}_m 的值决定于主磁通 $\dot{\Phi}_m$ ，即决定于 \dot{E}_1

$$U_1 \approx -E_1 = 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m = \dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{\Phi}_m \rightarrow \dot{I}_m$$

$$\dot{I}_m \leftarrow S \cdot B$$

$$\rightarrow H = \frac{B}{\mu}$$

$$\rightarrow \frac{1}{L_m}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

3/8

Q1: 变压器负载运行时，（ ）端电流的大小决定着（ ）端电流的大小。

A 原，副 B 副，原 C 原、副端电流大小
固定不变 D 不确定



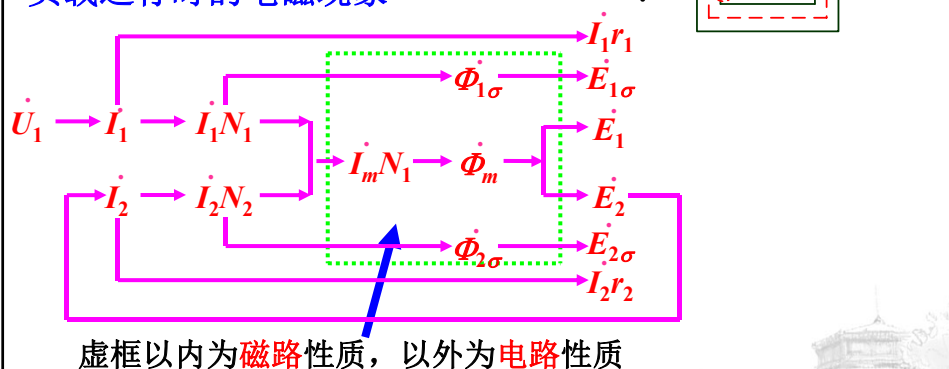
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

4/8

I. 负载运行时的电磁物理现象

负载运行时的电磁现象



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5/8

II. 基本方程式

磁动势平衡 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1$

电流表达式 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$

励磁支路电压降 $-\dot{E}_1 = \dot{I}_m (r_m + jx_m) = \dot{I}_m Z_m$

一次电压平衡式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$

二次电压平衡式 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$

电压变比 $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ ✓

负载电路电压平衡式 $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$

$k = \frac{U_1 \sim E_1}{U_2 \sim E_2}$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU


南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

6/8

B

Q2: 变压器的磁势平衡方程为 ()。


A 原、副端磁势的代数和等于合成磁势
 B 原、副端磁势的时间相量和等于合成磁势
 C 原、副端磁势的算术差等于合成磁势


 东南大学电气工程学院
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn> 7/8

III. 归算

- ▶ **绕组归算**：用一假想的绕组替代其中 m 个绕组使之成为 $k=1$ 的变压器 $\omega_1 \downarrow$
- ▶ 归算量在原符号加上标号 “'” 区别，归算后的值称为**归算值**或**折算值**
- ▶ **原则**：归算不改变实际变压器内部的电磁平衡关系
- ▶ 归算两种方法：
 - 二次归算到一次 $k=N_1/N'_2=1$
 - 一次归算到二次 $k=N'_1/N_2=1$


 东南大学电气工程学院
 SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

III-1. 二次电流的归算值

原则：归算前后磁势应保持不变

$$I_2' N_2' = I_2 N_2$$

$$I_2' = I_2 \frac{N_2}{N_2'} = I_2 \frac{N_2}{N_1} = I_2 / k$$

物理意义：当用 $N_2' = N_1$ 替代了 N_2 ，其匝数增加了 k 倍。为保持磁势不变，次级电流归算值减小到原来的 $1/k$ 倍。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III-2. 二次电动势的归算值

原则：归算前后电磁功率应保持不变

$$E_2' I_2' = E_2 I_2$$

$$\longrightarrow E_2' = \frac{I_2}{I_2'} E_2 = k E_2$$

物理意义：当用 N_2' 替代了 N_2 ，其匝数增加到 k 倍，而主磁通 Φ_m 及频率 f 均保持不变，归算后的次级电势应增加 k 倍。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

Q1: 一台单相变压器一次、二次绕组匝数比为10
若将二次绕组归算到一次绕组，则归算前、后的二
次侧电压之比是（ ）。

A 10: 1 B 1: 10 C 100: 1 D 1: 100



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III-3. 电阻的归算值

原则：归算前后二次铜耗应保持不变

$$I_2^2 r_2' = I_2^2 r_2$$

$$\longrightarrow r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 r_2 = k^2 r_2$$

物理意义：当用 N_2' 替代 N_2 后，匝数增加到 k 倍，次级绕组长度增加到 k 倍；次级电流减到为原来的 $1/k$ 倍，归算后的次级绕组截面积应减到原来的 $1/k$ 倍，故归算后的次级电阻应增加到原来的 k^2 倍（绕组本身没有变化）。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III-4. 漏抗的归算值

原则：归算前后二次漏磁无功损耗应保持不变

$$I_2'^2 x_2' = I_2^2 x_2$$

$$\rightarrow r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 x_2 = k^2 x_2$$

物理意义：绕组的电抗和绕组的匝数平方成正比。由于归算后次级匝数增加了 k 倍，故漏抗应增加到 k^2 倍。

$$x = \omega L = \omega AN^2$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

IV-1. 归算后的基本方程

磁动势平衡 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1$

电流表达式 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2')$

励磁支路电压降 $-\dot{E}_1 = \dot{I}_m (r_m + jx_m) = \dot{I}_m Z_m$

一次电压平衡式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$

二次电压平衡式 $\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'$

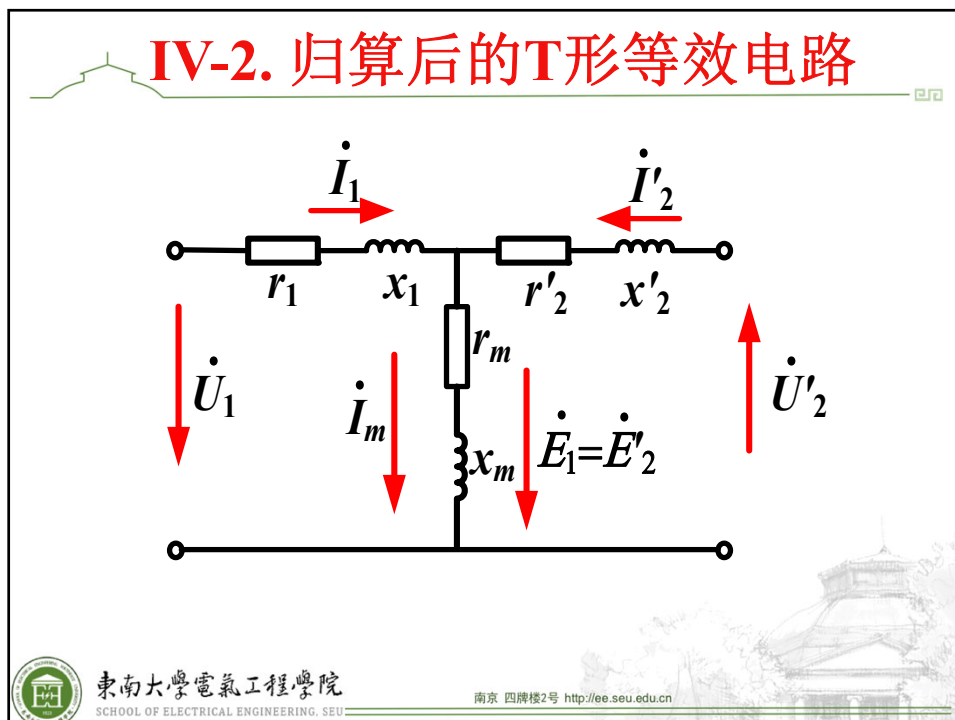
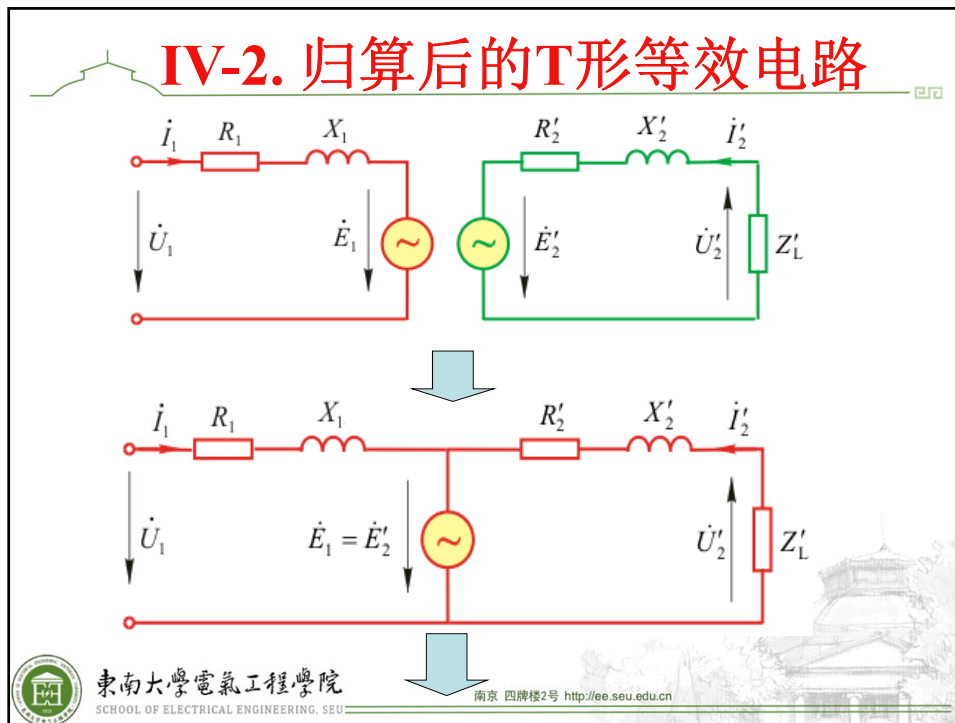
电压变比 $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$

负载电路电压平衡式 $\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_L'$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>



IV-3. 归算后的相量图

➤ **注意：**相量图的作法必须与方程式的写法一致，而方程式的写法又必须与所规定的正方向一致

➤ 变压器的相量图包括三个部分：

- ① 次级侧电压相量图
- ② 电流相量图或磁势平衡相量图
- ③ 初级侧电压相量图。

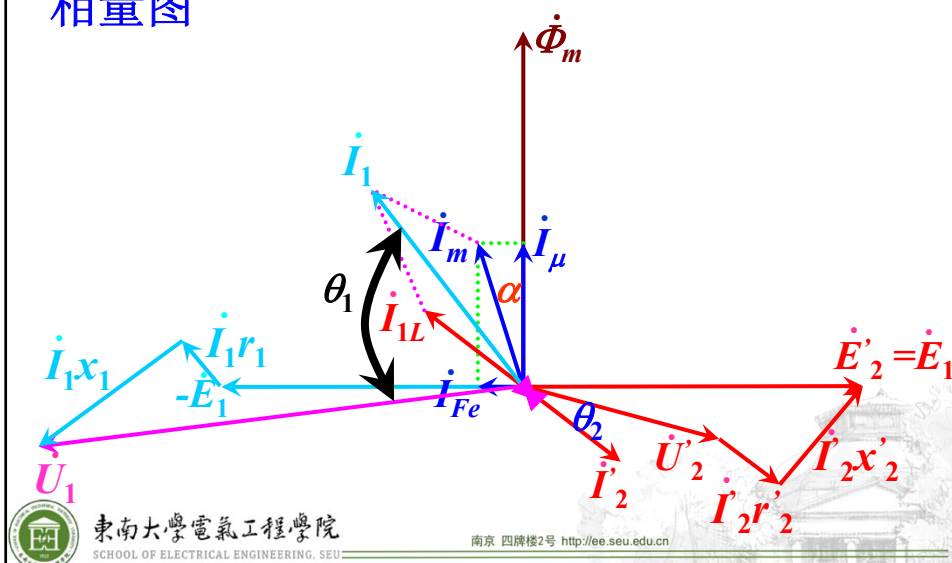


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

IV-3. 归算后的相量图

相量图



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

IV-3. 归算后的相量图

画相量图的依据

- (1) 基本方程式组：相量之间的关系，如何叠加
- (2) 不同量之间的相位关系，如电势和磁通
- (3) 不同元件的电压和电流的关系
 - 电阻、电容、电感
 - 相位角，电阻=0，电容<0、电感>0
- (4) 基本相量关系
 - 如 I 和 jI , $-jI$
 - E_1 和 $-E_1$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

19

IV-3. 归算后的相量图

T型等值电路的相量图

✦ 最常见的，已知 I_2 , U_2 , $\cos \theta_2$

求: \dot{I}_1 \dot{U}_1

✦ 步骤:

(1) 按比例画出 \dot{U}_2' , \dot{I}_2' , θ_2

- 依据:

$$U_2' = kU_2$$

$$I_2' = I_2 / k$$



T型等值电路的相量图



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV-3. 归算后的相量图

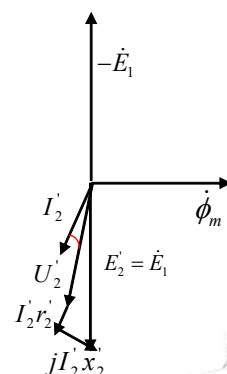
(2) 求出来 \dot{E}_2' , \dot{E}_1 , $-\dot{E}_1$, 并按比例画出

- 依据:

$$\begin{aligned}\dot{E}_2' &= \dot{U}_2' + \dot{I}_2' Z_2' \\ &= \dot{U}_2' + \dot{I}_2' r_2' + j \dot{I}_2' x_2' \\ E_2' &= E_1\end{aligned}$$

(3) 求 $\dot{\Phi}_m$

- 方向: 超前 E_1 相量90度
- 大小: 4.44公式



T型等值电路的相量图



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

IV-3. 归算后的相量图

(4) 求 I_m 相量

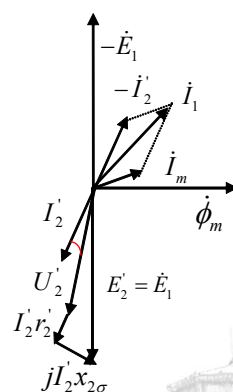
- 方向: $\alpha = \tan^{-1} \frac{r_m}{x_m}$

- 大小: $I_m = \frac{E_1}{|Z_m|}$

(5) 求 I_1 相量

- 依据:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2')$$



T型等值电路的相量图



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

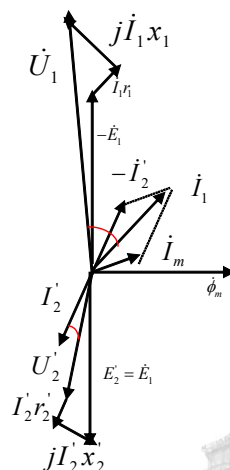
南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

IV-3. 归算后的相量图

(6) 求 U_1 相量

- 依据:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1\end{aligned}$$



T型等值电路的相量图



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV-3. 归算后的相量图

总结作图步骤:

- 选定一个参考相量、且只能有一个参考相量。常以 \dot{U}_2' 为参考相量，根据给定的负载画出负载电流相量 \dot{I}_2'
- 根据次级侧电压平衡式 $\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' Z_2'$ 可画出相量 \dot{E}_2' ，由于 $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ ，因此也可画出相量 \dot{E}_1
- 主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 应超前 $\dot{E}_1 90^\circ$ ，励磁电流又超前 $\dot{\Phi}_m$ 一铁耗角 α
- 由磁势平衡式 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2')$ 求得 \dot{I}_1
- 由初级侧电压平衡式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ 求得 \dot{U}_1



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

变压器的分析方法比较

- 基本方程式组
 - 原始；准确
 - 定量计算
- 等效电路
 - 简化；场 → 路，
 - 定量计算、定性分析
- 相量图
 - 对应于等效电路
 - 定性分析



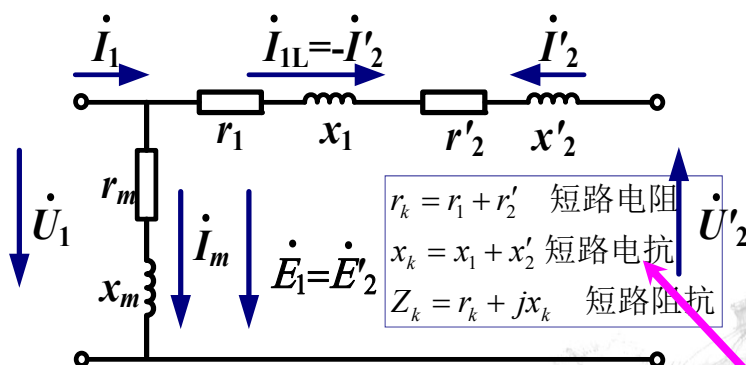
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

25

V-1. 近似等效电路

- 变压器的励磁电流（即空载电流）为额定电流的 **3%-8%**，（大型变压器不到**1%**）
- 把励磁支路移至端点处，计算时引起的误差不大



通过短路试验测得

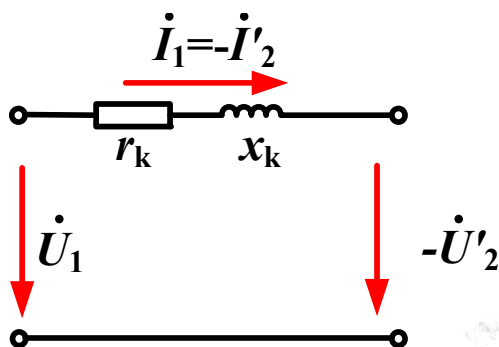


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

V-2. 简化等效电路

- 略去励磁电流（支路）
- 计算有较大误差，常用于定性分析



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

Q1: 將T型等效電路的（ ）去掉，可得到簡化等效電路。

- A** 一次側電路 **B** 激磁分支的電路 **C** 二次側電路
D 一次側電路和激磁分支的電路



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

4. 标么值

标么值=实际值/基值

- **定义**：对各个物理量选一个**固定的数值**作为基值，取实际值与基值之比称为该物理量的标么值
- 标么值用**下标 “* ”**
- 基值（采用下标 “**b**”）
 - 电压基值**：额定电压 $U_{1b}=U_{1N}, U_{2b}=U_{2N}$
 - 电流基值**：额定电流 $I_{1b}=I_{1N}, I_{2b}=I_{2N}$
 - 容量基值**：额定容量 $S_b=S_N$
 - 阻抗基值**：额定电压与额定电流之比
- **初级、次级侧各物理量应采用不同基值，建议按相值计算。**



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

4. 标么值

	单相	三相
电压基值	额定 相 电压	额定 线 电压
电流基值	额定 相 电流	额定 线 电流
容量基值	额定容量	额定容量（总）
阻抗基值	电压基值/电流基值	



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

4. 标么值

标么值的优点

1. 计算方便，容易判断计算错误
2. 采用标么值计算同时也起到了归算作用
3. 采用标么值更能说明问题

$$r_{2*} = \frac{r_2}{Z_{2b}} = \frac{r_2}{\frac{U_{2N}}{I_{2N}}} = \frac{k^2 r_2}{k^2 \frac{U_{2N}}{I_{2N}}} = \frac{r_2'}{k \frac{U_{2N}}{I_{2N}/k}} = \frac{r_2'}{\frac{U_{2N}'}{I_{2N}'}} = \frac{r_2'}{\frac{U_{1N}'}{I_{1N}'}} = \frac{r_2'}{Z_{1b}} = \frac{r_2'}{Z_{1b}} = r_{2*}'$$

标么值的缺点

各物理量无量纲，无法根据量纲的关系来判断结果正确与否



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5. 参数测定方法

➤ 空载试验

测定励磁电阻 r_m 和励磁电抗 x_m

➤ 短路试验

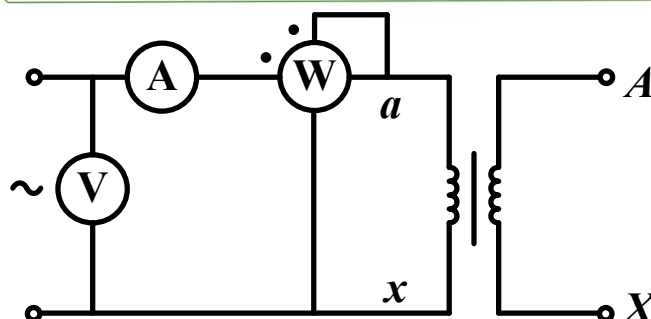
计算短路电阻 r_k 和短路电抗 x_k



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

I. 空载试验



- 试验可在高压侧测量也可在低压侧测量，视实际测量方便而定。
- 如令低压侧开路，在高压侧进行测量，所测数据为高压侧值。如令高压侧开路，在低压侧进行测量，测得的数据是低压侧的值，计算的激磁阻抗也是归算至低压侧的值。



SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

I. 空载试验

空载特性曲线 $U_0=f(I_0)$

- 通过调压器给变压器供电，调压器输出电压 U_{10} ，从 $1.2 U_N$ 到 $0.3 U_N$ 取 8-9 点，每点均测出 P_0 ， I_0 ， U_{20}
- 空载试验时电压较高，电流较小，故电流要精确测量
- 电流表及功率表电流接线图中流过的电流为实际空载电流

东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

I. 空载试验

空载试验参数计算: z_0 , r_0 , x_0

- 励磁参数值随饱和而变化, 为反映变压器运行时的磁路饱和情况, 空载试验时应调整外施电压等于额定电压
- 令 U_0 为外施每相电压, I_0 为每相电流, P_0 为每相输入功率即等于每相的空载损耗 p_0

$$z_0 = \frac{U_0}{I_0} \quad r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$$

$$\longrightarrow x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = x_1 + x_m \approx x_m$$

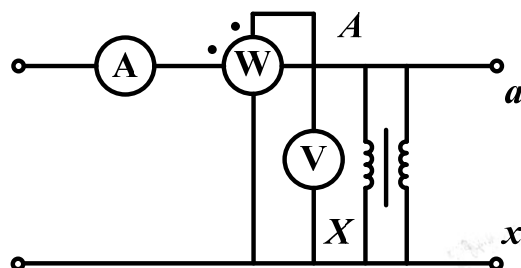


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 短路试验

- 短路试验应降低电压进行, 控制短路电流不超过额定值
- 短路试验可以在高压侧测量而把低压侧短路, 也可在低压侧测量而把高压侧短路。二者测得的数值不同, 用标么值计算则相同



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 短路试验

短路特性曲线 $U_k = f(I_k)$

- 试验开始时应注意调压器输出应调到零，然后从0开始，慢慢调节，并监视电流表，使短路电流 $I_k \approx 1.25I_N$ 时停止升压，防止过大电流产生，对变压器不利
- 记录数据 U_k , I_k ，从 $1.25I_N$ 到 $0.5I_N$ 测 5~6 点。由于 U_k 低，铁心中 Φ 低，故 p_k 中所含铁耗较小，可忽略铁耗，故 p_k 中只含铜耗



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 短路试验

短路试验参数计算: z_k , r_k , x_k

- U_k 表示每相电压， I_k 表示每相电流， P_k 表示每相输入功率，即等于每相短路损耗 p_k

$$z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad r_k = \frac{p_k}{I_k^2} \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

$$r_k = r_1 + r_2' \quad x_1 = x_2' = x_k / 2$$

- 电阻随温度而变化，如短路试验时的室温为 $\theta(^{\circ}\text{C})$ ，按标准规定应换算到标准温度 75°C 时的值



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 短路试验

短路电压百分数: U_{kN}

- **定义:** 短路试验时, 使短路电流恰为额定电流的外施电压 u_k , 称为 U_{kN}
- 以额定电压百分数表示, 称为短路电压百分数

$$u_k = \frac{U_{kN}}{U_N} \times 100\% = \frac{I_N z_k}{U_N} \times 100\%$$

- 短路电压的有功分量与无功分量

$$u_a = \frac{I_N r_{k75}}{U_N} \times 100\% \quad u_r = \frac{I_N x_k}{U_N} \times 100\%$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 短路试验

短路电压百分数: U_{kN}

- 短路电压百分数去掉100%符号, 就是短路电压标么值

$$u_{k*} = \frac{I_N z_k}{U_N} = z_{k*}$$

$$u_{a*} = \frac{I_N r_{k75}}{U_N} = r_{k*} \quad u_{r*} = \frac{I_N x_k}{U_N} = x_{k*}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

例题：

一台单相变压器， $S_N=1000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=60/6.3\text{ kV}$ ， $f_N=50\text{Hz}$ 。空载试验在低压侧进行，当电压为额定值时，测得 $I_0=10.1\text{A}$ ， $P_0=5000\text{W}$ ；短路试验在高压侧进行，当 $U_k=3240\text{V}$ 时， $P_k=14000\text{W}$ ， $I_k=15.15\text{A}$ ，求：

- (1) 设 $R_1=R_2'=R_k/2$ ， $X_{1\sigma}=X_{2\sigma}'=X_k/2$ ，求折算到高压侧的参数；
- (2) 画出折算到高压侧的T形等效电路；
- (3) 用标么值表示的短路阻抗及其分量和用百分值表示的短路电压及其分量；
- (4) 用简化等效电路计算满载，且 $\cos\varphi_2=0.8$ 滞后时副边电压、电压变化率、原边电流和效率。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

解：

(1) 根据额定电压比，可求得变比 $k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{60}{6.3} = 9.5$

短路试验在高压侧，求得折算到高压侧的短路阻抗；

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{3240}{15.15} = 213.86(\Omega) \quad r_k = \frac{P_k}{I_k^2} = 61(\Omega)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = 205(\Omega)$$

开路试验在低压侧，求得低压侧的激磁阻抗

$$Z_m = \frac{U_0}{I_0} = \frac{6300}{10.1} = 623.76(\Omega) \quad r_m = \frac{P_0}{I_0^2} = 49(\Omega)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} = 621.83(\Omega)$$

折算到高压侧的激磁阻抗

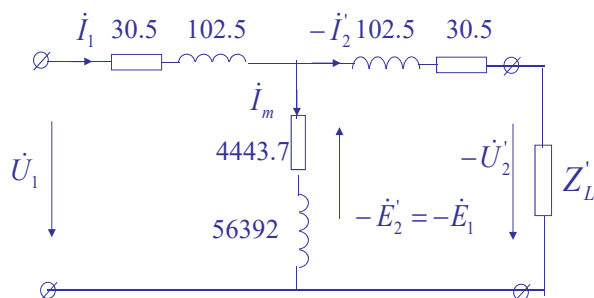
$$r_m' = k^2 r_m = 4443.7(\Omega) \quad X_m' = k^2 X_m = 56392(\Omega)$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

(2) 画出T形等效电路



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

(3) 求标么值

阻抗基值

$$Z_b = Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{U_N^2}{S_N} = 3600(\Omega)$$

$$\therefore Z_k^* = \frac{Z_k}{Z_b} = \frac{213.86}{3600} = 0.059, r_k^* = \frac{r_k}{Z_b} = 0.017$$

$$X_k^* = \frac{X_k}{Z_b} = 0.057$$

短路电压及其分量

$$U_k^* = Z_k^* = 5.9\%, U_{kr}^* = r_k^* = 1.7\%$$

$$U_{kx}^* = X_k^* = 5.7\%$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

6. 变压器的运行性能

- 电压变化率
- 变压器的效率



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I. 电压变化率

- **电压变化程度**：由于变压器内部存在着**电阻**和**漏抗**，负载时产生**电阻压降**和**漏抗压降**，导致次级侧电压随负载电流变化而变化
- **电压变化率**：设外施电压为**额定电压**，取**空载**与**额定负载**两种情况下的次级侧电压的**算术差**与**空载电压**之比，又称**电压调整率**

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I. 电压变化率

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100 \rightarrow \Delta U\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100$$

用副边量表示

$$\rightarrow \Delta U\% = \frac{U_{1N} - U'_2}{U_{1N}} \times 100$$

用原边量表示

$$\rightarrow \Delta U\% = (1 - U_{2*}) \times 100$$

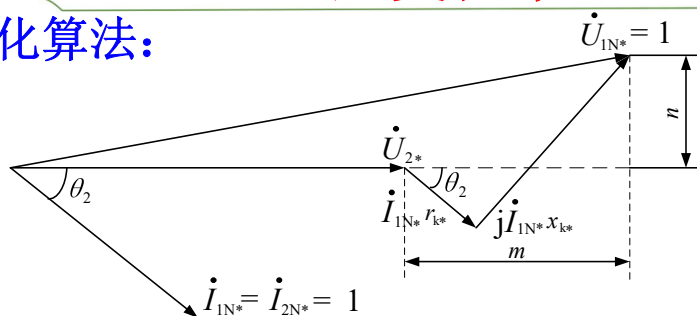


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 http://ee.seu.edu.cn

I. 电压变化率

简化算法:



$$U_{2*} = \sqrt{1 - n^2} - m \approx 1 - \frac{n^2}{2} - m \rightarrow \Delta U\% = \left(m + \frac{n^2}{2} \right) \times 100$$

$$\rightarrow \Delta U\% = [u_{a*} \cos \theta_2 + u_{r*} \sin \theta_2 + \frac{1}{2} (u_{r*} \cos \theta_2 - u_{a*} \sin \theta_2)^2] \times 100$$

$$\rightarrow \Delta U\% = (u_{a*} \cos \theta_2 + u_{r*} \sin \theta_2) \times 100 = (r_{k*} \cos \theta_2 + x_{k*} \sin \theta_2) \times 100$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 http://ee.seu.edu.cn

I. 电压变化率

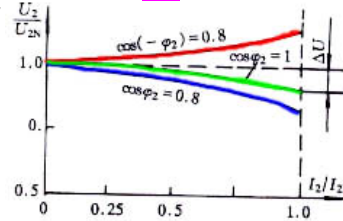
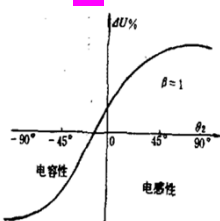
电压变化率与负载性质：

电阻电感性负载：

$$\Delta U\% = [u_{a*} \cos \theta_2 + u_{r*} \sin \theta_2 + \frac{1}{2}(u_{r*} \cos \theta_2 - u_{a*} \sin \theta_2)^2] \times 100$$

电阻电容性负载：

$$\Delta U\% = [u_{a*} \cos \theta_2 - u_{r*} \sin \theta_2 + \frac{1}{2}(u_{r*} \cos \theta_2 + u_{a*} \sin \theta_2)^2] \times 100$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I. 电压变化率

电压变化率与负载大小：

额定负载：

$$\Delta U\% = (r_{k*} \cos \theta_2 + x_{k*} \sin \theta_2) \times 100$$

一般负载：

定义负载系数：

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

$$\Delta U\% \approx \beta(r_{k*} \cos \theta_2 + x_{k*} \sin \theta_2) \times 100$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I. 电压变化率

影响端电压的因素小结:

$$\Delta U\% = \beta(r_k^* \cos \theta_2 + x_k^* \sin \theta_2) \times 100$$

- 负载大小 $\beta = I_1/I_{1N} = I_2/I_{2N}$
- 漏阻抗 r_k, x_k
- 负载性质 θ_2 :

容性负载 $\Delta U < 0$

感性负载 $\Delta U > 0$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 变压器的效率

- 效率: 输出功率与输入功率之比
- 输入功率是输出功率与全部损耗之和
- 损耗 $\sum p$
 - 初级绕组铜耗 $p_{cu1} = I_1^2 r_1$
 - 次级绕组铜耗 $p_{cu2} = I_2^2 r_2$
 - 铁芯损耗 $p_{Fe} = I_m^2 r_m$

$$\sum p = p_{Cu} + p_{Fe}$$

- $\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \sum p) = (P_1 - \sum p)/P_1$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 变压器的效率

间接法计算效率：损耗分离法

- 空载试验时, I_0 很小, 只考虑铁耗 $p_{Fe}=I_0^2 r_m$, 铜耗 $p_{Cu1}=I_0^2 r_1=0$, 因此空载损耗 $p_0=p_{Fe}=I_0^2 r_m$
- 短路试验时, U_k 很小, I_m 很小, 铁耗 $p_{Fe}=I_m^2 r_m=0$, 只考虑铜耗 $p_{CuN}=I_N^2 r_1+I_N^2 r_2'=I_N^2 r_k$, 因此 $p_{kN}=p_{CuN}=I_N^2 r_k$
 - ➡ 额定损耗: $\Sigma p_N = p_{Fe} + p_{CuN} = p_0 + p_{kN}$
 - ➡ 任意负载时的损耗: $\Sigma p = p_0 + \beta^2 p_{kN}$
- 任意负载时, 不考虑 U_2 的变化, 即 $U_2 = U_{2N}$, 则二次侧输出功率 $P_2 = U_2 I_2 \cos \theta_2 = U_{2N} I_{2N} I_2 / I_{2N} \cos \theta_2 = \beta S_N \cos \theta_2$
 - ➡ $P_1 = P_2 + \Sigma p = \beta S_N \cos \theta_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0$
 - ➡ $\eta = P_2 / P_1 = \beta S_N \cos \theta_2 / (\beta S_N \cos \theta_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0)$



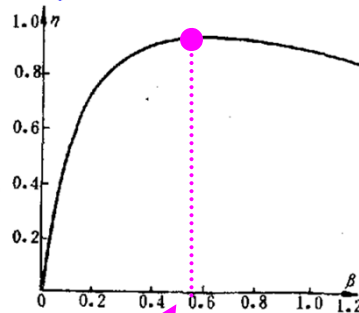
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II. 变压器的效率

效率曲线 $\eta = \beta S_N \cos \theta_2 / (\beta S_N \cos \theta_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0)$

- 当负载的功率因数保持不变, 效率随负载电流而变化的关系称为效率曲线
- 不变损耗 p_0 : 不随负载电流变化
- 可变损耗 $\beta^2 p_{kN}$: 随负载电流二次方变化
- 极值条件: $d\eta/d\beta = 0$
- 当可变损耗等于不变损耗时, 效率达到最大



一般 $\beta_m = 0.5 \sim 0.77$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

(4) 求电压变化率

$$\Delta u = r_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2 = 0.017 \times 0.8 + 0.057 \times 0.6 = 0.048$$

$$\text{副边电压标么值 } U_2^* = 1 - \Delta u = 1 - 0.048 = 0.952$$

$$\text{副边电压实际值 } U_2 = U_2^* \cdot U_{2N} = 0.952 \times 6300 = 5998.86(V)$$

$$\text{副边满载时额定电流 } I_2 = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{1000}{6.3} = 158.73(A)$$

$$\text{满载运行时铜耗: } p_{kN} = p_k \cdot \left(\frac{I_{1N}}{I_k}\right)^2 = 14000 \times \left(\frac{16.67}{15.15}\right)^2 = 16950(W)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \left(1 - \frac{p_0 + I_2^2 p_k}{I_2 S_N \cos \varphi_2 + p_0 + I_2^2 p_k}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{5000 + 16950}{1000000 \times 0.8 + 5000 + 16950}\right) \times 100\% \\ &= 97.3\% \end{aligned}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

小 结

- 变压器磁路中存在着主磁通和漏磁通。主磁通同时匝链初级、次级绕组，在初级、次级绕组中产生感应电势 E_1 和 E_2 ，由于初级、次级绕组的匝数不同，从而实现了电压的变换
- 主磁通在传递电磁功率过程中起着媒介作用
- 漏磁通只匝链初级绕组或次级绕组，它对变压器电磁过程的影响是起漏抗压降的作用，而不直接参与能量的传递



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

小 结

- 在变压器中存在着初级绕组和次级绕组各自的电势平衡关系和两绕组之间的磁势平衡关系
- 当次级侧电流和磁势变化时，将倾向于改变铁芯中的主磁通 Φ_m 及感应电势 E_1 ，即破坏初级侧电势平衡关系。此时初级侧会自动增加一电流分量 I_L 和相应磁势 $I_L N_1$ ，以平衡次级侧磁势的作用，使初级侧电势达到新的平衡
- 通过电势平衡关系与磁势平衡关系，能量从初级侧传递至次级侧



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

小 结

- 在铁芯饱和时，为了得到正弦变化的磁通，励磁电流中必须含有高次谐波，尤其是三次谐波
- 在变压器分析中常采用等效正弦波电流来等值代替
- 考虑铁耗后，等效励磁电流超前主磁通一个角度：铁耗角



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

小 结

- 把次级侧的量折算至初级侧，可以得到初级、次级间有电流联系的等效电路
- 基本方程式、等效电路和相量图是分析变压器内部电磁关系的三种方法
- 变压器的电抗参数和磁通对应： x_m 对应主磁通，随饱和程度不同； x_1 对应初级漏磁通， x_2 对应次级漏磁通
- 主要性能指标是电压变化率 ΔU 和效率 η ，其数值受变压器参数和负载的大小及性质的影响



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

小 结

- x_m 对应主磁通， x_m 越大，励磁电流 $I_m(I_0)$ 越小
- 增加 N_1 (U_1 不变)， Φ_m 将减小，磁路饱和程度下降，磁阻减小，励磁电抗 x_m 将增大；副方绕组匝数 N_2 对 Φ_m 无影响
- 增加铁芯截面积，如 Φ_m 不变，饱和降低， x_m 将增大
- 增加 U_1 大于 U_N ，则 Φ_m 将增大，磁路饱和上升， x_m 将减小

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

作 业

- 思考题： 2-11~2-12（不需要做在本子上）
- 习题： 2-5、 2-7、 2-8、 2-9
- 注意： 1. 标么值*，归算值'，基值b； 2. 测量侧
- 要求： 重点理解各参数的物理意义及相互间关系
 1. 按时交作业，过期不改；
 2. 书写认真，文字整齐，抄题目，用直尺作图；
 3. 数据精确到小数点后两位；



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

八、思考题

1、通常做变压器的空载实验时在低压边加电源，而做短路实验时在高压边加电源，这是为什么？

答：空载试验时，往往需要加到额定电压，而试验电流较小，低压侧的额定电压低，比较容易获得，所以从低压侧通电。短路试验时，往往并不需要较高的电压，而电流一般是额定电流或接近额定电流，高压侧额定电流较小，比较容易得到，所以从高压侧通电。

2、在做变压器空载实验与短路实验时，仪表的布置有什么不同？说明理由。

答：在做变压器空载实验与短路实验时，电流表包含在电压表里的，即电压表所测电压包含电流表所分的压，若把电压表直接接在阻抗两端，由于阻抗的阻值很大，与电压表的阻值可比拟，这样电流表的值就包括了流过电压表和流过阻抗的电流，导致测量的电流值不准确。

3、为什么做空载实验时，所测量的数据中一定要包含额定电压点。

答：空载试验的目的之一是测取励磁阻抗 Z_m ， Z_m 的大小是随磁路饱和程度变化的。变压器正常运行时，一次绕组外施电压是额定电压，主磁通和磁路饱和程度由一次额定电压决定，是基本不变的，因此 Z_m 有确定的值。若空载试验时不加额定电压，则测得的 Z_m 就与正常运行时的值不同，也就不能用作等效电路中的参数。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>